

O QUE É O CLIMA: QUID EST CLIMA?

Os mecanismos e processos que geram o clima e as suas variações ocorrem num sistema físico extremamente complexo, que inclui, além da atmosfera, os oceanos, as grandes massas de gelo e a natureza da superfície.

JOSÉ PINTO PEIXOTO

Quando os astronautas da nave «Apolo 8» contemplaram o planeta Terra ficaram extasiados. Era um planeta esbranquiçado, rodeado por uma auréola diáfana e azulada, que se esbatia e difundia contra um mar de escuridão. E que verdade encerrava! Era, afinal, a confirmação do paradigma físico do sistema climático. Fornecia uma visão integrada dos processos complexos que contribuem para o clima da Terra, através do albedo dos continentes, dos oceanos e da atmosfera, isto é, da fracção da energia incidente solar que é reflectida e retrodifundida para o espaço. A auréola era, afinal, a assinatura delicada da presença da atmosfera e dos oceanos e dos processos que contribuem para o clima do ecossistema singular, que é o planeta Terra.

Mas o que é o Clima?

No tratado famoso «As Confissões» St. Agostinho mostrou como é difícil compreender a natureza e estrutura do tempo, através duma citação que ficou célebre.

Agora, seguindo o exemplo de Santo Agostinho,aremos nós uma questão equivalente, que se aplica ao nosso caso:

«Quid est Clima?

Si nemo a me quaerat, scio!

Si quaerenti explicare velim, nescio!»

Que em Português se dirá:

«O que é o Clima?

Se ninguém me perguntar o que é, eu sei!

Se me perguntarem o que é e eu quiser explicar, não sei!»

Após esta nossa confissão, contamos com a vossa absolvição ao tratarmos dum assunto tão complexo como o clima.

O clima deixou uma marca indelével no Homem desde o seu aparecimento na Terra, criando formas de cultura próprias e contribuindo para a ascensão e evanescimento de civilizações.

O clima constitui um elemento-chave na ecologia global. Determina a distribuição geográfica das espécies

animais e vegetais e afecta, profundamente, o seu comportamento e as suas características morfológicas.

O clima actua e modela todas as fases do ciclo hidrológico, determinando a intensidade da circulação da água e as suas modificações. O clima actua, directa e indirectamente, sobre o relevo e é um factor decisivo da fisiografia do Globo.

Que podemos nós dizer acerca da evolução do clima da Terra? Ainda não há muitos anos, as mudanças de clima eram encaradas como um problema que tinha que ver, vagamente, com as épocas glaciárias, num passado geológico remoto. Não se pensava que o clima actual pudesse sofrer modificações, ou evoluir, ainda que apresentasse flutuações. Estas eram sempre consideradas de carácter accidental e local e admitia-se que, passado algum tempo, se compensariam. O clima corresponderia às «condições médias normais», e os desvios seriam inerentes à própria definição de valor médio e teriam carácter aleatório, ou accidental. Era, podemos dizer, um conceito estático, que corresponderia a um estado de



Licenciado em Matemática, licenciado e doutorado em Ciências Geofísicas pela Universidade de Lisboa, José Pinto Peixoto publicou uma extensa obra científica em revistas internacionais nos domínios da Hidrologia, da Meteorologia e da Climatologia; alguns desses trabalhos, nomeadamente sobre a energética da circulação geral da atmosfera e sobre a dinâmica do ciclo hidrológico, são hoje considerados fundamentais. Professor catedrático da Faculdade de Ciências de Lisboa, professor convidado ou visitante de eminentes universidades estrangeiras (M.I.T., Berkeley, etc.), director do Instituto Geofísico Infante D. Luís, membro do Comité Executivo da «European Science Foundation», o Prof. Pinto Peixoto é o actual Presidente da Academia das Ciências de Lisboa.

quase equilíbrio da atmosfera com as suas vizinhanças.

Reconhece-se que o clima, considerado **impropriamente** como um «estado normal», caracterizado, por definição, pelos valores médios dos elementos climáticos relativos a um período de 30 anos, determinado pela Organização Meteorológica Internacional (OMI, Varsóvia, 1931), **era uma concepção estática**, que não explicava muitos dos factos, que constituem manifestações na sua variabilidade no decurso do tempo. Esses factos são como que uma assinatura da história do clima na Terra. São evidentes na Geologia, na Botânica, na Zoologia, na Antropologia e na História da Humanidade.

O clima transforma-se e evolui, apresentando variações, flutuações, ou mesmo mudanças. É esta nova atitude, dentro da concepção dinâmica, que faz do clima, nos nossos dias, um dos domínios principais da investigação das Ciências da Atmosfera e do Ambiente.

O clima deixou de ser um conceito puramente académico, extravasou o *forum* científico e popularizou-se. Hoje é um elemento de alto **interesse económico** e um elemento essencial no planeamento da indústria, da agricultura, do turismo, da urbanização, etc. O clima constitui um **recurso natural** insubstituível.

Durante a nossa geração foi-nos já dado observar tantas calamidades e **desastres meteorológicos** e climatológicos. Estes vão das cheias às grandes secas, das tempestades, com fúrias devastadoras, à persistência duma aridez que pode levar à desertificação. Gerou-se, assim, uma maior consciência da vulnerabilidade da humanidade perante o clima.

A grande seca, que afectou o Sahel e a Etiópia de 1968 a 1979, com os grandes sofrimentos das populações e os problemas ecológicos resultantes, alertaram a opinião mundial para a importância das variações do clima e para os problemas globais, universais, relativos à qualidade de vida da sociedade humana.

Por outro lado, começou a desenhar-se a preocupação, hoje certeza, de que as **actividades do homem** podiam afectar a própria fragilidade do clima.

Na acepção original, clima vem do grego (klima), que designava uma zona do Globo, limitada por duas latitudes. Estava associado à **inclinação** dos raios solares e, por extensão, às características meteorológicas predominantes, designadamente os meteoros, as nuvens, a **«quentura»**, os ventos, etc.

Na acepção geral, **o clima é a síntese do tempo e a nossa expectativa sobre as condições meteorológicas futuras**. E este é, em essência, o conceito de clima que convém preservar.

NATUREZA DO PROBLEMA

Para compreender os mecanismos e os processos físicos responsáveis pelo clima, é necessário, primeiro,

ter uma ideia clara das características, da estrutura e do comportamento do clima.

Como a atmosfera é um sistema termo-hidrodinâmico deve ser caracterizada pela sua composição, pelo seu estado termodinâmico, especificado pelas variáveis termodinâmicas (temperatura, pressão, densidade, etc.), e pelo seu estado mecânico (velocidades, acelerações, etc.). Uma descrição completa do estado da atmosfera deveria ainda incluir outras variáveis, como a nebulosidade, a precipitação, a distribuição da energia, etc., que afectam o comportamento de larga escala da atmosfera. Tradicionalmente os elementos do clima mais importantes são a **temperatura** e a **precipitação**. É com base nestes elementos que se faz a classificação dos climas da Terra.

Duma forma geral, a distribuição geográfica dos climas mostra que os climas da região equatorial são **quentes** e **húmidos**, que nas regiões subtropicais são **quentes** e **secos**, nas regiões das latitudes médias e elevadas o clima é **temperado** e **húmido** e que, finalmente, nas regiões polares e subpolares os climas são **frios** e **secos**. Nós sabemos, no entanto, que esta distribuição planetária não dá uma descrição completa dos climas regionais e locais. Temos, ainda, que considerar o contraste oceanos-continentes e a influência moderadora dos oceanos na temperatura, os efeitos do relevo na precipitação, na nebulosidade e na temperatura; a influência dos campos de gelo na temperatura; etc.

Sabemos que o clima é modelado por **factores internos** e por **factores externos**. Tradicionalmente, os **factores externos** podem agrupar-se em: *a) factores gerais*, como a radiação solar, a esfericidade do globo, os movimentos de rotação da Terra e de translação em volta do Sol; a existência de continentes e de oceanos; *b) factores regionais e locais*, tais como a distância ao oceano, o relevo, a natureza da superfície, a cobertura vegetal, a proximidade de lagos, etc.

Os **factores internos** dizem respeito às propriedades intrínsecas da atmosfera, tais como a composição da atmosfera, a circulação geral, os sistemas frontais, as perturbações, etc.

Se recorremos à metodologia termodinâmica, podemos dizer que a atmosfera, tomada como um sistema termodinâmico, não se pode considerar separadamente dos sistemas vizinhos, adjacentes. Estes compreendem o **hidrossistema**, que inclui os oceanos, lagos e rios; o **criossistema**, formado pelas massas de gelo e de neve da Terra; o **litossistema** subjacente, e o **biossistema** da flora e da fauna. Todos estes sistemas naturais, de composição e de propriedades físicas tão diferentes, estão ligados entre si por fluxos de massa e de energia, constituindo um sistema global que é o **sistema climático**. Este sistema é extremamente complexo, devido às interacções não lineares dos vários componentes.

É importante fazer uma **distinção entre o tempo meteorológico** e o **clima**. O tempo está ligado às condições meteorológicas instantâneas e à evolução, no dia-a-dia,

A ESTRUTURA DO SISTEMA CLIMÁTICO

dos sistemas sinópticos (depressões, frentes, etc.). O estado da atmosfera é caracterizado por flutuações rápidas e, por vezes, aleatórias, quer no decurso do tempo, quer no espaço e o tempo meteorológico identifica-se com o estado variável da atmosfera, em cada instante. Fundamentalmente, o estudo da evolução do tempo requer a solução de um problema de valores iniciais.

O clima, por outro lado, pode ser considerado como as condições meteorológicas médias, que predominam numa dada região ou local, completado por uma medida de variabilidade e, por vezes, pelos valores extremos das variáveis. Em linguagem figurada, podemos dizer que o clima é a síntese do tempo. O seu estudo requer a solução dum problema de condições-fronteira e de valores iniciais.

É importante notar que as variáveis físicas, que são relevantes para o estudo do tempo, são as mesmas que caracterizam o clima. No entanto, o que distingue o problema do tempo do problema do clima é o desprezo dos pormenores e detalhes das flutuações diárias no estado da atmosfera, em favor das várias estatísticas produzidas por uma colectividade, ou sequência de estados individuais, instantâneos. Assim, o clima fica independente e livre de flutuações estatísticas de qualquer realização individual. Vemos, portanto, que os princípios de conservação da massa, de momento angular e de energia, que constituem o fundamento físico para estudar o comportamento instantâneo da atmosfera, isto é, o tempo, são, na essência, os mesmos princípios físicos em que se fundamenta o estudo do clima.

Definiremos sistema na concepção termodinâmica, como uma região do espaço limitada por uma parede real, ou conceptual, que contém energia e massa. Tudo o que rodeia um sistema define o seu universo complementar, ou o seu ambiente. A região do universo complementar adstrita ao sistema, em que se faz sentir a sua influência, chama-se vizinhança do sistema. Quando um sistema é constituído pela união de várias partes disjuntas diz-se que é um sistema composto e cada uma das partes designa-se por subsistema do sistema composto.

Os sistemas dizem-se isolados quando não há transferências de energia e de massa com o seu universo complementar. Um sistema diz-se fechado quando não há transferência de massa entre o sistema e o seu universo complementar, podendo, no entanto, haver trocas de energia. Um sistema diz-se aberto quando permuta massa e energia com o seu universo complementar. Um sistema aberto está em ligação permanente com o seu ambiente, através de fluxos de energia, de matéria e de informação. Há uma interacção permanente entre ambos, influenciando-se mutuamente.

Em face do que temos vindo a dizer, podemos aceitar que o sistema climático, S, é constituído pela união de vários subsistemas abertos, disjuntos, que são a atmosfera, A, os oceanos, O, os continentes, L, a criosfera, C, e a biosfera, B, isto é:

$$S \equiv A \cup O \cup L \cup C \cup B$$

Como se mostra na Fig. 1, todos os subsistemas do sistema climático são abertos e não isolados, interagindo todos entre si. No entanto, o sistema climático global

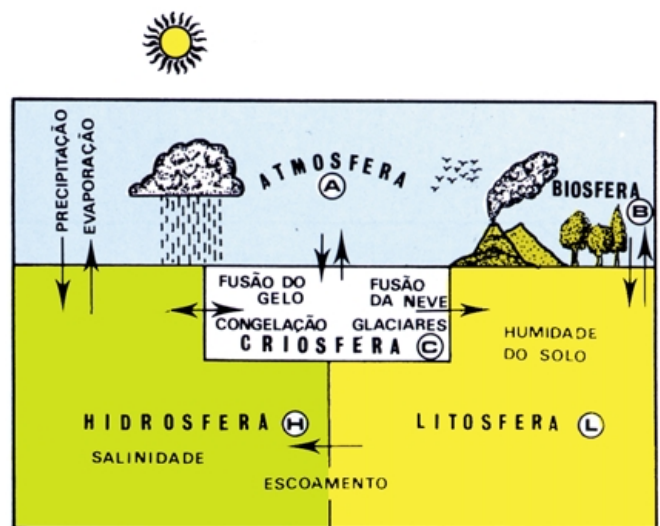


Fig. 1 – Esquema do sistema climático e dos processos de interacção entre os vários subsistemas.

constitui um sistema não isolado para a energia, mas fechado, não havendo troca significativa de massa com o espaço exterior. A atmosfera, a hidrosfera, a criosfera e a biosfera formam uma cascata de sistemas ligados por processos físicos complexos envolvendo fluxos de energia, de momento angular e de matéria, através das fronteiras e gerando numerosos mecanismos de auto-realimentação (*feed-back*).

Os componentes do sistema climático são sistemas heterogéneos, caracterizados pelas suas composições químicas diferentes e pelas suas propriedades físicas distintas.

As escalas temporais (que são proporcionais ao tempo de resposta) dos diversos componentes do sistema climático variam, consideravelmente, de subsistema para subsistema e também no interior dum mesmo subsistema. Como exemplo, as escalas temporais da atmosfera vão desde alguns minutos, ou horas, na camada limite, até semanas e meses na atmosfera livre. Na camada superior de mistura dos oceanos as escalas temporais variam desde alguns meses, até anos, no

entanto, nas águas profundas dos oceanos as escalas temporais variam desde séculos até milênios. Para os fenômenos tectônicos as escalas temporais são da ordem de milhões de anos.

Com base na diferença dos tempos de resposta é conveniente, devido à complexidade do sistema climático e dos seus sistemas internos, hierarquizar os subsistemas, considerando, primeiro, os subsistemas, com tempos de resposta menores. Assim, para escalas de tempo que vão de dias a semanas, a atmosfera pode ser tomada como constituindo o componente interno único do sistema climático ($S \equiv A$) formando, portanto, os oceanos, as massas de gelo e os continentes o sistema externo, cujas ações forçadoras se traduzem pelas condições de fronteira, na interface dos vários componentes do sistema climático com a atmosfera.

Para escalas de tempo que vão de meses a anos, o sistema climático interno tem que incluir a atmosfera e os oceanos, $S \equiv A \cup O \cup C$, e, por vezes, a cobertura de

neve e os gelos dos oceanos, isto é, a criosfera. Já para o estudo da variabilidade do clima, em épocas passadas, deve incluir-se também no sistema interno toda a criosfera, $S \equiv A \cup O \cup C$, considerando como ação forçadora externa a ação dos continentes.

Os tempos de relaxação variam entre limites muito afastados, como se indica na Fig. 2. Esta mostra também os vários processos que podem causar flutuações no sistema climático. Logo, o sistema climático global deve ser encarado como um sistema em evolução contínua, com umas partes variando relativamente às outras. As interações, altamente não lineares, entre os vários subsistemas tendem a ocorrer em muitas escalas, quer no tempo, quer no espaço. É por isso que os vários subsistemas do sistema climático não estão em equilíbrio mútuo, uns em relação aos outros, nem mesmo em equilíbrio individual interno. Além disso, em cada subsistema há ainda, mecanismos de auto-realimentação (*feed-back*), que se devem tomar em consideração.

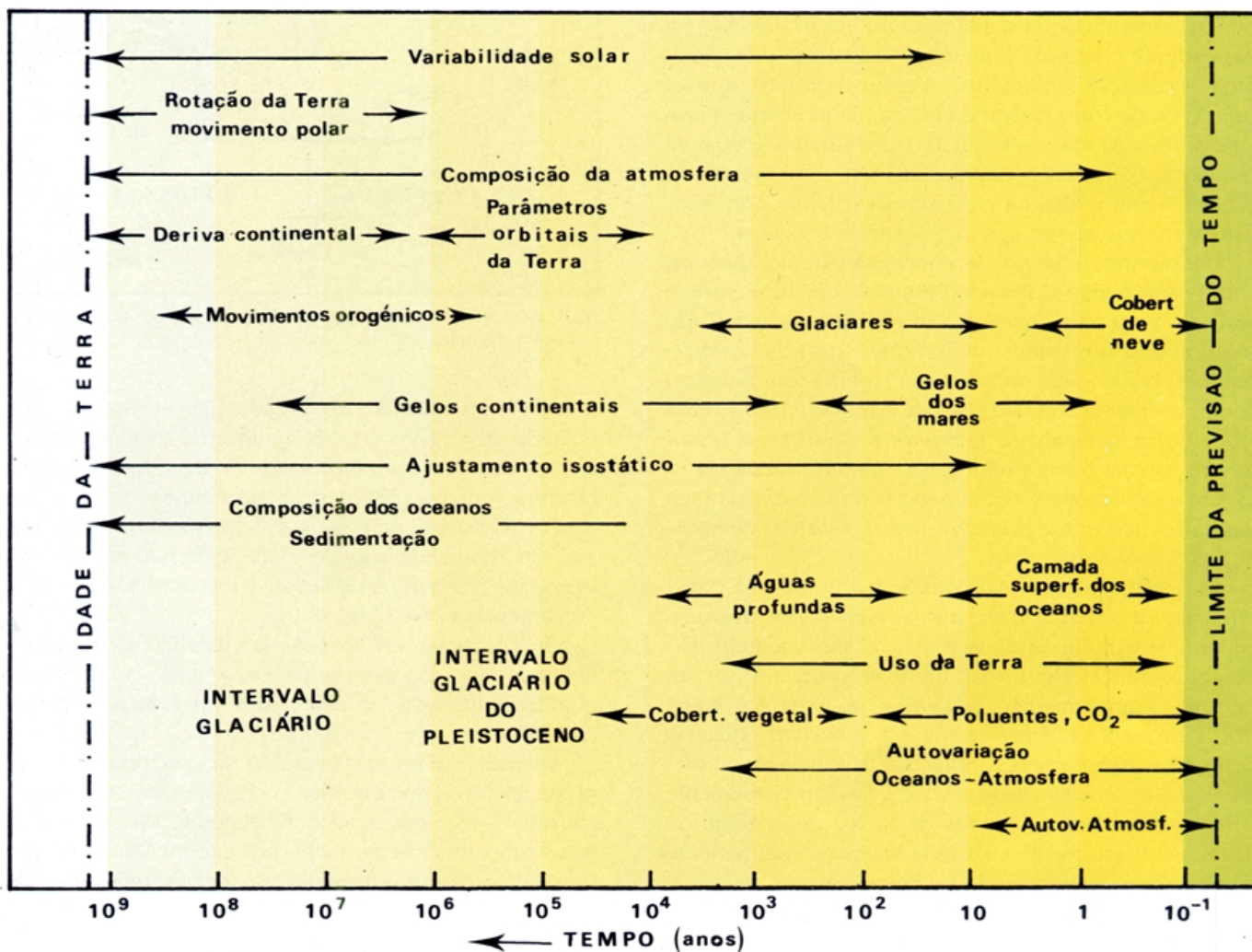


Fig. 2 – Escalas características temporais para vários componentes do sistema climático e para alguns factores externos. As escalas vão de 10^{-1} a 10^9 anos.

O ESTADO DO SISTEMA CLIMÁTICO

Um sistema interno, ainda que sujeito a uma acção forçadora externa constante, experimenta, em geral, flutuações acidentais ou aleatórias. Podemos, por isso, aceitar que à mesma acção forçadora corresponde uma grande variedade de estados do sistema, que formam uma colectividade estatística. Assim, o clima pode definir-se em termos da média sobre a colectividade, completado com uma lei de distribuição de probabilidade. Para condições forçadoras externas, fixas, admitimos que, no limite, existe um conjunto único de estatísticas e aceitamos a hipótese ergódica, que nos permite substituir médias sobre a colectividade por médias temporais.

Assim, podemos definir o estado do clima como um estado conceptual do sistema climático, caracterizado pelos valores médios, juntamente com a sua variabilidade, dum conjunto completo de grandezas atmosféricas, hidrosféricas e criosféricas, referidas a um dado intervalo de tempo e a uma região do sistema globo-atmosfera. A descrição do estado inclui valores médios, variâncias e outras estatísticas, para períodos particulares, previamente fixados. O intervalo de tempo, que define a escala climática temporal, deve ser superior à vida média dos sistemas meteorológicos de escala sinóptica (vários dias) que caracterizam o estado do tempo, e ao período limite teórico em que o comportamento da atmosfera pode ser previsto localmente (da ordem de dez dias).

Podemos, por isso, falar em estados climáticos mensais, estacionais, anuais, etc. Quando se tomava para intervalo fundamental o período de trinta anos, como a Organização Meteorológica Internacional (OMI) recomendava, os valores médios designavam-se *impropriamente* por valores normais do clima. No entanto, esta definição tradicional, completada com estatísticas de ordem mais elevada, é ainda um conceito muito útil, se não for tomada com o significado de «fixidez», que implicava a definição tradicional de «clima normal».

Para um conjunto diferente de condições exteriores obtém-se estados do clima do sistema interno também diferentes. Assim, podemos definir variação do clima como a diferença entre dois estados climáticos da mesma espécie, tais como as diferenças entre os estados climáticos de dois meses de Agosto, de duas décadas típicas, etc. As variações devem incluir, além das diferenças das médias, estatísticas de ordem mais elevada. Uma anomalia climática pode definir-se como o desvio, para um estado particular do clima, definido para um determinado intervalo de tempo, dos valores espectáveis; calculados sobre uma colectividade homóloga (de anos, de estações, de meses, etc.).

Podemos ainda estabelecer uma certa hierarquia na variabilidade do clima, passando das flutuações aleatórias para as variações e, finalmente, para as mudanças de clima. Estas seriam, assim concebidas, como as variações significativas para intervalos de tempo muito mais

longos, às quais se poderia atribuir uma causa bem definida.

Nas considerações feitas sobre o estado de tempo e sobre o clima mencionámos que as leis físicas que governam as respectivas evoluções são fundamentalmente as mesmas. No entanto, a aplicação das equações a estes problemas são diferentes. Nos estudos do clima é necessário considerar não só os efeitos internos mas, também, as interacções complexas entre a atmosfera e os outros subsistemas. Para a previsão de tempo, pode aceitar-se que a atmosfera se comporta com uma certa inércia, de tal forma que as condições fronteiriças podem ser desprezadas. Trata-se, em princípio, dum problema de condições iniciais. Por exemplo, as flutuações da temperatura nas superfícies dos oceanos e a cobertura da neve e dos gelos podem ser ignorados na previsão do tempo a curto e a médio prazo (até uma a duas semanas). No entanto, estas flutuações vão afectar gradualmente a baixa atmosfera e tornam-se importantes e mesmo decisivas, quando se quer estudar o clima.

Partindo dum dado estado inicial, as soluções das equações que governam a dinâmica de sistemas não lineares, como a atmosfera, originam, para um intervalo de tempo infinito, um conjunto ilimitado de estatísticas. As soluções limites, para condições iniciais diferentes, podem ser, ou não, únicas. Se a integração das equações conduzir ao mesmo conjunto de estatísticas, quaisquer que sejam as condições iniciais, o sistema diz-se *ergódico* ou *transitivo*.

Se há duas, ou mais, soluções em que uns estados iniciais conduzem a um conjunto de estatísticas e outros estados iniciais conduzem a outro conjunto, o sistema diz-se *intransitivo* (ver fig. 3). Há ainda uma subclasse de sistemas, a que chamaremos sistemas *quase intransitivos*, cujas estatísticas, tomadas sobre um intervalo de tempo suficientemente grande, mas finito, diferem consideravelmente dum intervalo de tempo para o outro. Tudo se passa, neste caso, como se o sistema pudesse satisfazer a dois regimes climáticos diferentes. Se o sistema fosse transitivo, as estatísticas do equilíbrio do clima seriam estáveis e únicas, conduzindo a um único regime climático. A quase intransitividade pode ser devida a instabilidades internas, ou a processos de auto-realimentação, que ocorrem nos diferentes componentes do sistema climático interno. Os períodos glaciários e interglaciários, que se têm vindo a observar na história da Terra, poderiam levar-nos a concluir que o sistema climático se comportaria como um sistema *quase intransitivo*. Contudo, a informação geológica e histórica, de que se dispõe, não é ainda suficiente para se decidir, de forma conclusiva, qual o tipo de comportamento do sistema climático. No entanto, os problemas da unicidade e da estabilidade das soluções são fundamentais na análise da problemática do determinismo climático.

A *dificuldade em fazer previsões do clima* resulta, como mostra a teoria do caos, da não linearidade das equações diferenciais que governam o sistema, o que

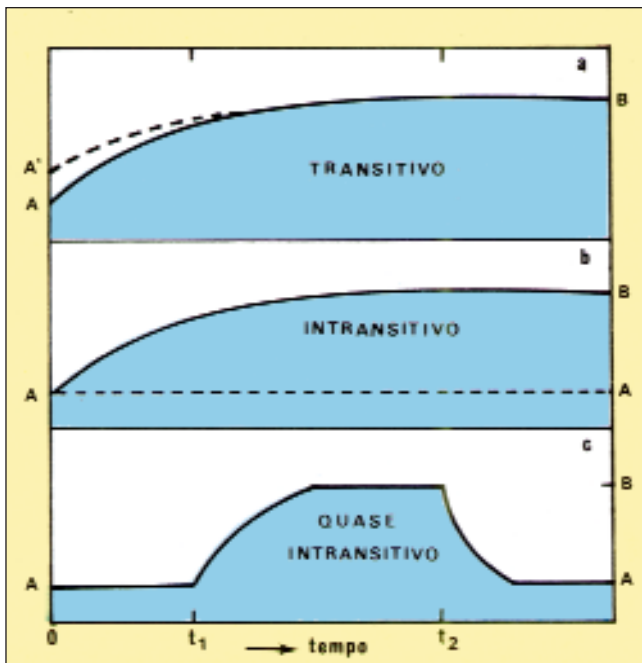


Fig. 3 – Diagramas de fase em que se representam o comportamento transitivo (a), intransitivo (b) e quase intransitivo (c), partindo do mesmo estado inicial. Num sistema intransitivo dois estados iniciais A e A' conduzem a um mesmo estado de equilíbrio B. Num sistema intransitivo, o mesmo estado inicial pode conduzir a dois, ou mais, estados de equilíbrio B e A. Um sistema quase intransitivo comporta-se como um sistema intransitivo num dado intervalo de tempo, mudando para um estado alternativo B, onde se pode manter, ou retornar ao estado climático A.

significa que as soluções dependem de forma crítica da precisão das condições iniciais. Assim se explica também, em parte, a diversidade considerável de pontos de vista de alguns sectores da comunidade científica, que consideram prematuras as conclusões obtidas sobre a acção do dióxido de carbono no efeito de estufa, ou sobre a depleção da camada do ozono, obtidas com modelos matemáticos deterministas.

É ainda prematuro atribuir às previsões do clima, baseados nos vários modelos de simulação matemática, um grande grau de confiança, porque os resultados dos modelos podem diferir largamente, devido às diferenças

nas hipóteses em que se baseiam. Os modelos contêm simplificações e limitações na simulação dos fenómenos e dos processos climáticos, porque, em muitos casos, ou não são muito bem compreendidos, ou não são mesmo conhecidos. Devemos ainda notar que a capacidade dos modelos reproduzirem as condições do clima actual, não constitui uma garantia suficiente para que esses modelos sejam capazes de prever possíveis mudanças do clima.

VARIABILIDADE CLIMÁTICA

O clima tem variado de forma significativa e contínua, no decurso da história da Terra, com períodos glaciários, alternando com períodos interglaciários.

Fundamentalmente, a variabilidade do clima pode exprimir-se em função de dois modos essenciais:

a) *Variações forçadas*, que são a resposta do sistema climático a alterações da acção forçadora externa e b) *variações livres*, devidas a instabilidades internas e a mecanismos de auto-realimentação, que conduzem a interacções não lineares entre os diferentes componentes do sistema climático. Estas ocorreriam sempre, mesmo que não se verificassem variações forçadas.

As variações dos factores externos, que afectam o sistema climático, mas que não são afectadas pelas variáveis do clima, constituem o que podemos chamar as *causas externas do clima*, enquanto as variações relacionadas com as interacções não lineares, entre os vários processos físicos no sistema interno, constituem as *causas internas do clima*. É evidente que a distinção entre estas duas classes nem sempre é muito nítida.

As *causas externas* compreendem as acções forçadoras de natureza astronómica e de natureza terrestre. Os factores astronómicos incluem variações: a) na intensidade de irradiação solar; b) nos parâmetros orbitais da Terra designadamente, na excentricidade da órbita, na precessão axial e na obliquidade da eclíptica (parâmetros de Milankovitch, ver figura 4); c) a velocidade de rotação da Terra.

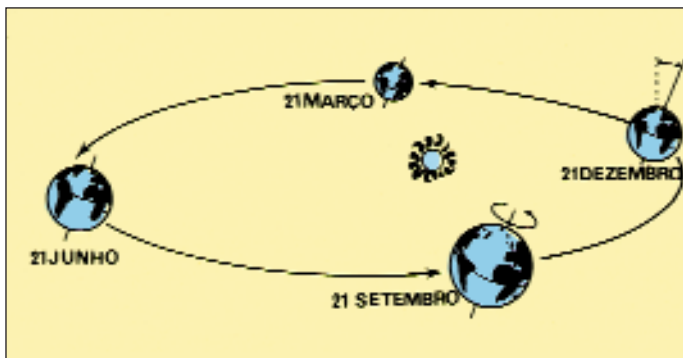


Fig. 4a – As estações do ano são devidas à inclinação do eixo de rotação da Terra, em relação ao plano da eclíptica. No hemisfério Norte, o Verão ocorre no afélio e com o Pólo Norte dirigido para o lado do Sol.

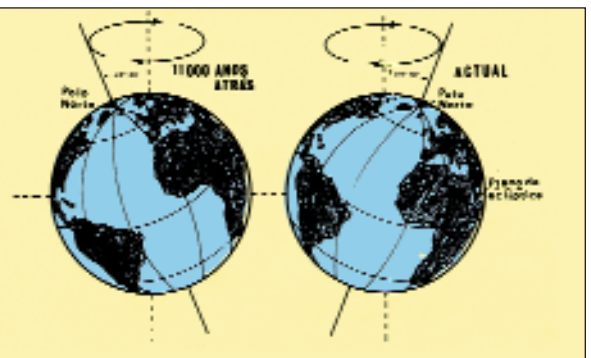


Fig. 4b – O eixo de rotação da Terra descreve um cone no espaço, com uma abertura de $23^{\circ} 1/4$, em, aproximadamente, 22000 anos.

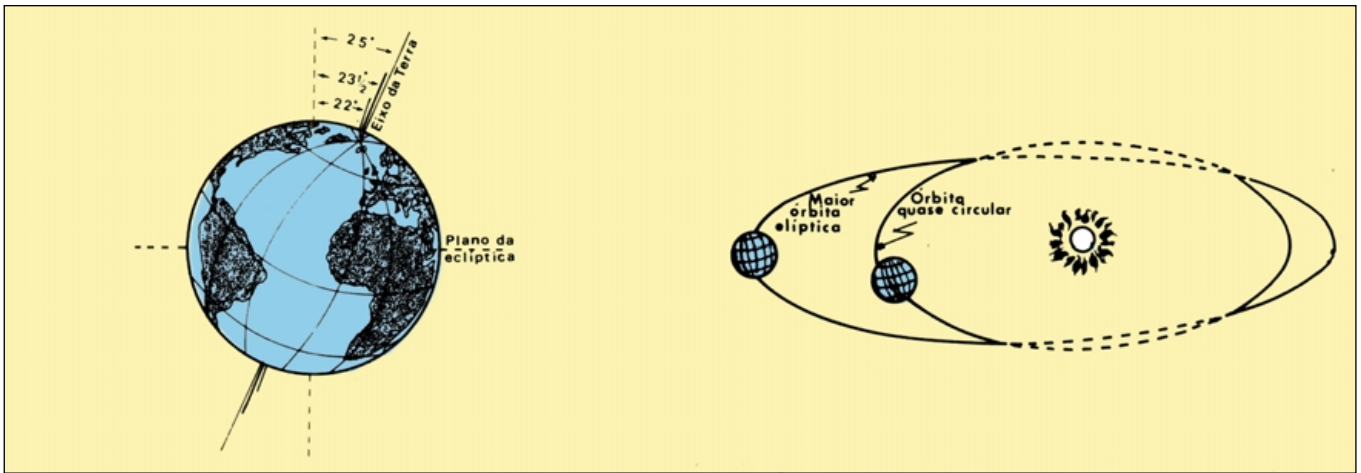


Fig. 4c – A inclinação do eixo de rotação, em relação ao plano da eclíptica, varia no decurso de 41000 anos entre 22° e 25°. Presentemente o seu valor é de 23°30'.

Fig. 4d – A órbita da Terra é uma elipse de que o Sol ocupa um dos focos. No decurso do tempo a forma da órbita varia entre uma elipse de grande excentricidade e outra quase circular.

A acção forçadora terrestre inclui: *a)* variações na composição da atmosfera (concentração de vapor de água, de dióxido de carbono, de ozono e de aerossóis), devidas a erupções vulcânicas e à actividade humana; *b)* variações da superfície dos continentes e do uso da terra pelo homem (deflorestações, desertificações, práticas agrícolas, etc.); *c)* variações de longo período, associadas a factores tectónicos, como a deriva dos continentes, os processos de orogenia e as variações da posição do pólo. Têm ainda sido sugeridos outros possíveis mecanismos forçadores terrestres e astronómicos, tais como a variação da irradiância solar, a colisão da Terra com matéria interplanetária, a variação da actividade vulcânica e as variações do fluxo de calor geotérmico, etc. As causas internas estão associadas a variados mecanismos de auto-realimentação, positiva ou negativa, e a outras interacções fortes, entre a atmosfera e os oceanos e entre a atmosfera e a criosfera, etc. Estes processos conduzem a instabilidades ou oscilações do sistema, que podem actuar independentemente, ou introduzir modificações acentuadas nos efeitos das acções forçadoras externas.

Vejamos alguns exemplos da diferença entre variações forçadas externas e variações livres internas. As variações sazonais ou diurnas do clima estão relacionadas com factores astronómicos, sendo, por isso, forçadas externamente. Todavia, há as variações do tempo, no dia-a-dia, que ocorrem independentemente de qualquer factor externo. São flutuações irregulares, com escalas de tempo de dias a semanas, que estão associadas, por exemplo, à passagem das perturbações migratórias atmosféricas (anticiclones e depressões), ou à passagem dos sistemas frontais. Estas são variações livres, porque resultam da instabilidade baroclínica interna da circulação geral da atmosfera, que, por sua vez, depende de um valor crítico do gradiente latitudinal da temperatura do ar.

Para ilustrar a grande variabilidade do clima, no decurso do tempo, apresentamos um espectro da temperatura do ar junto à superfície da Terra, de acordo com Mitchell, 1976, fig. 5.

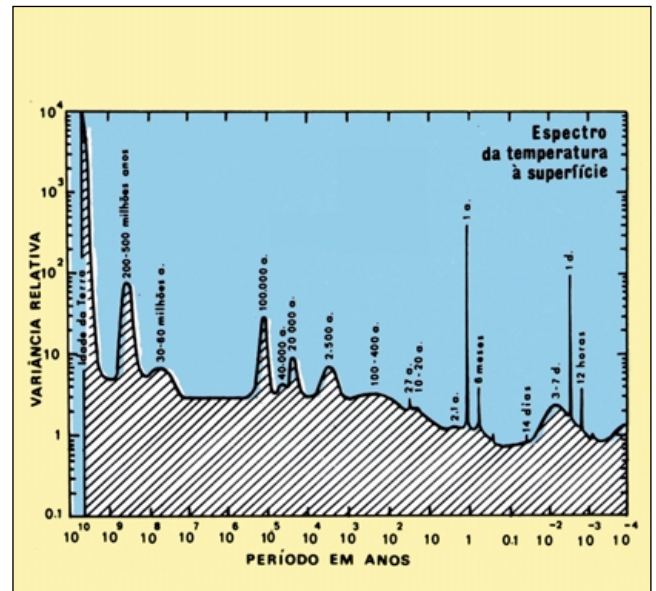


Fig. 5 – Esquema do espectro da temperatura da atmosfera no decurso dos tempos, desde há 10¹⁰ anos até à actualidade.

A inspecção do espectro mostra que tem vários picos; uns são muito bem definidos e localizados no tempo, enquanto outros são menos bem delineados, mas apresentando máximos bem caracterizados. Os primeiros são determinados por factores astronómicos e correspondem a componentes, verdadeiramente periódicas, da variabilidade do clima, tais como as variações diurnas e anuais. Os outros são devidos a componentes quase periódicas, ou mesmo a componentes aperiódicas, mas

com uma escala preferencial de energetização. O pico de 3-7 dias está associado às perturbações sinópticas, que dominam o estado do tempo nas latitudes médias e elevadas. O máximo no espectro, que se alonga de 100 a 400 anos, está associado a episódios semelhantes à «pequena idade do gelo», que se verificou desde o início do século XVII até meados do século XIX, com uma diminuição da temperatura média do ar e um aumento considerável da extensão dos glaciares nas regiões montanhosas da Europa. O pico correspondente a 2000 anos é, talvez, devido ao arrefecimento que se observou depois do «clima ótimo», há cerca de 5000 anos, e que predominou durante as grandes civilizações da antiguidade. Os três picos seguintes estão relacionados com as variações deterministas astronómicas dos parâmetros da órbita terrestre, que se supõem responsáveis pelas idades glaciárias, designadamente: *a*) a excentricidade da órbita da Terra com um ciclo de 100 000 anos, aproximadamente; *b*) a precessão axial com um ciclo de 22 000 anos; e *c*) a variação da obliquidade da eclíptica, ou seja, da inclinação do eixo terrestre, com um período de 41 000 anos. Por fim, os picos à volta de 45 e de 350 milhões de anos podem estar relacionados com as glaciações devidas a efeitos orogénicos e tectónicos e com efeitos da deriva dos continentes. Ver fig. 4.

Para um sistema não linear as variações forçadas conduziriam a uma relação simples de causa e efeito; se a acção forçadora fosse um processo oscilatório, a resposta do sistema teria exactamente a mesma frequência. Mas nós já vimos que este não é o caso do sistema climático interno, que é inerentemente instável e nunca atinge o estado de equilíbrio.

Podemos, portanto, concluir que a variabilidade do clima resulta de interações complexas entre variações livres e variações forçadas, visto que o sistema climático é um sistema dissipativo, altamente não linear, com várias fontes de instabilidade. A natureza interactiva, e, muitas vezes, não linear da instabilidade e dos mecanismos de auto-realimentação do sistema climático tornam muito difícil obter uma interpretação imediata de causa-efeito.

ALGUNS MECANISMOS DE AUTO-REALIMENTAÇÃO

O conceito de auto-realimentação é de particular relevância em sistemas abertos, como são os componentes do sistema climático. Os mecanismos de interacção actuam como controlos internos do sistema e resultam dum acoplamento, com uma compensação mútua, entre dois, ou mais, elementos do sistema climático interno. Parte do sinal de saída é reenviado para o sinal de entrada, o que, na sequência altera o sinal de saída anterior, de tal forma que o mecanismo de realimentação pode actuar, amplificando a anomalia do sinal de saída (auto-realimentação positiva), ou, noutros casos, amorte-

cendo ou esbatendo a anomalia proveniente do sinal excitador (auto-realimentação negativa).

À semelhança da metodologia usada em Engenharia Electrónica, vamos aplicar estes conceitos ao sistema climático num caso simples. Tomando em atenção que o sistema climático está em equilíbrio radiativo, a temperatura média da superfície do Globo, T_{sfc} constitui uma das respostas do sistema climático às acções forçadoras externas, tomando em consideração todos os mecanismos de auto-realimentação internos. Quaisquer perturbações externas devidas, por exemplo, a variações no albedo, na quantidade de vapor de água, nas nuvens, na concentração de dióxido de carbono, etc., induzirão uma perturbação no balanço radiativo no topo da atmosfera, ΔF_{TA} .

Para restabelecer o equilíbrio, as variáveis do sistema climático incluindo a temperatura da superfície do globo, T_{sfc} variarão a fim de se ajustarem ao novo estado de equilíbrio. Portanto, tomaremos ΔF_{TA} como anomalia do sinal de entrada do sistema climático e T_{sfc} como o sinal de saída (ver fig. 6). Podemos então escrever:

$$\Delta T_{sfc} = G_F \Delta F_{TA}$$

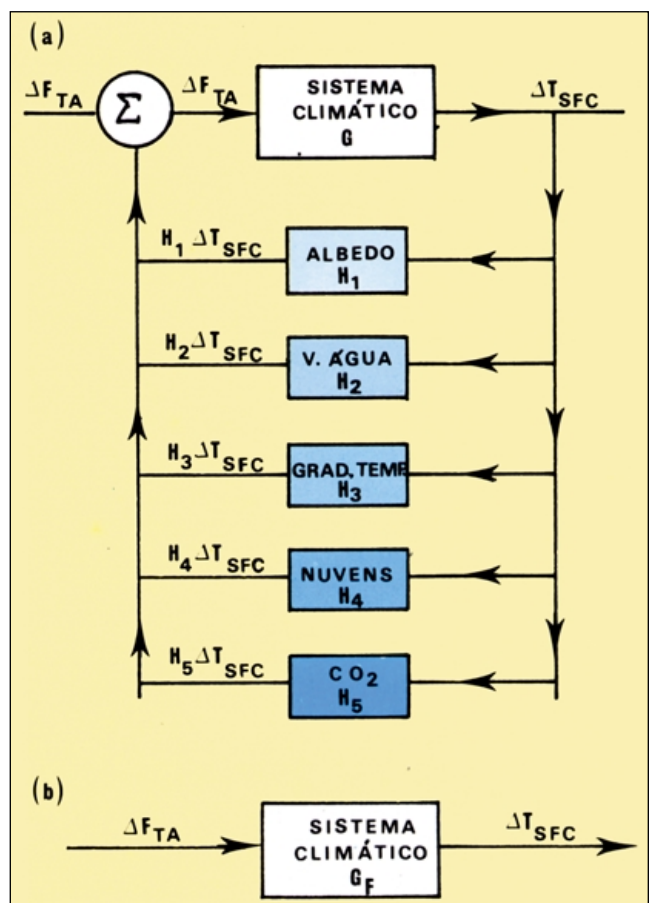


Fig. 6 – Exemplo de um conjunto de circuitos de auto-realimentação no sistema climático em que a entrada é o balanço radiativo no topo da atmosfera e o sinal de saída é a temperatura à superfície da Terra. G, H_1, H_2, \dots, H_5 e G_F representam o ganho, os factores de auto-realimentação e o ganho efectivo do sistema climático.

em que G_F é o ganho, ou função de transferência do sistema. G_F engloba todos os processos de realimentação, que se manifestam em resposta à perturbação externa ΔF_{TA} . Para os mecanismos de auto-realimentação o sinal de entrada é agora ΔT_{sfc} e cada processo é caracterizado por uma função de transferência H_i .

Há um grande número de mecanismos de auto-realimentação, que actuam no interior dos vários componentes do sistema climático, ou entre os vários subsistemas.

A reflectividade para a radiação solar (albedo) é um factor muito importante para o balanço da energia. O valor elevado, que apresenta para a neve e para o gelo transformam-na num dos factores dominantes do clima em especial das regiões polares. A extensão das camadas de gelo e de neve depende grandemente da temperatura do ar junto à superfície. Se, por qualquer razão, a temperatura diminuísse, a quantidade de neve e de gelo aumentariam e, portanto, verificar-se-ia um aumento do albedo planetário. Assim, a energia disponível para aquecer a atmosfera seria menor e a temperatura da atmosfera sofreria um novo decréscimo.

Por outro lado, se a extensão da camada de gelo e de neve decrescesse, a correspondente diminuição do albedo levaria a um aumento da temperatura do ar e, portanto, à fusão do gelo e da neve, diminuindo a sua extensão. Estas interacções neve-gelo-albedo-temperatura são exemplos de auto-realimentação positiva.

Outro exemplo, de auto-realimentação positiva, é o efeito de estufa do vapor de água. Se, por qualquer razão, a temperatura aumentasse, a evaporação à superfície da Terra e o conteúdo de água da atmosfera aumentariam também. Como o vapor de água é um forte absorvente da radiação terrestre, mais energia seria captada pela atmosfera, donde resultaria um maior aquecimento, o que reforçaria o aumento da temperatura. Se, por outro lado, a temperatura baixasse, devido a qualquer outra razão (e.g. mecanismo de realimentação gelo-albedo), a quantidade de vapor de água na atmosfera diminuiria e o efeito de estufa tornar-se-ia menos efectivo.

O efeito de estufa pode ocorrer com outros absorventes selectivos da radiação terrestre, como o dióxido de carbono, o ozono e outros elementos minoritários.

Como exemplo de auto-realimentação negativa mencionaremos o da temperatura do ar-emissão atmosférica. Se a temperatura do ar aumentasse, a atmosfera perderia mais energia, devido a uma maior intensidade da radiação emitida para o espaço (Lei de Stefan), reduzindo, portanto, a temperatura e atenuando a perturbação inicial.

Por vezes, dão-se como exemplos simples de mecanismos de auto-realimentação, as interacções nebulosidade-temperatura. No entanto, as nuvens, por serem excelentes absorventes da radiação terrestre e reflectores da radiação solar, podem, de facto, originar vários mecanismos de auto-realimentação. São ainda estes dois efeitos, de natureza oposta, que fazem das nuvens um

factor essencial, mas extremamente complexo, dos balanços radiativos e energéticos da Terra. A quantidade de radiação emitida para o espaço depende da temperatura dos topos das nuvens, mais frios, e é, em geral, inferior à quantidade de radiação emitida pela superfície, mais quente, da Terra. Assim, a quantidade de radiação terrestre, que seria emitida para o espaço é reduzida pela presença das nuvens, e uma parte fica retida pela camada inferior da atmosfera, contribuindo para o efeito de estufa do vapor de água.

Parece que a influência da reflectividade elevada da radiação solar predomina para as nuvens baixas e médias, conduzindo a um arrefecimento, com o aumento da nebulosidade, enquanto para as nuvens altas (cirros), mais transparentes, predomina a absorção da radiação terrestre, o que vai reforçar o efeito de estufa. O resultado final dos vários efeitos de auto-realimentação das nuvens, nem sempre é fácil de avaliar, porque depende não só da nebulosidade como do tipo de nuvens e da altura das bases.

A complexidade das múltiplas interacções associadas a efeitos de auto-realimentação, no sistema climático, torna-se evidente na interacção oceano-atmosfera. Neste caso, a temperatura da superfície dos oceanos tende a afectar, fortemente, a estrutura térmica da camada inferior de contacto da atmosfera, enquanto a acção desta sobre os oceanos se faz sentir, principalmente, através das tensões dos ventos sobre a superfície dos oceanos. São estas tensões tangenciais dos ventos que originam as correntes marítimas, que constituem a circulação geral dos oceanos.

OS BALANÇOS DA RADIAÇÃO E DA ENERGIA DO SISTEMA CLIMÁTICO

As duas acções forçadoras mais importantes, que actuam sobre o sistema climático e modelam o seu comportamento, são a energia da radiação solar e a acção da gravidade.

A radiação solar é a fonte primária da energia de todos os processos naturais que ocorrem no sistema climático. As outras possíveis fontes cósmicas de energia para o sistema climático são desprezáveis, em face da energia proveniente do Sol.

A radiação solar, que incide no topo da atmosfera, é, em parte, transmitida no interior dos sistemas e, em parte, transformada noutras formas de energia, que eventualmente são dissipadas pelas circulações gerais da atmosfera e dos oceanos e, em parte, utilizada nos processos químicos e biológicos.

No sistema climático a energia ocorre sob várias formas, tais como a energia interna, a energia potencial e cinética, a energia radiante, etc. De todas as formas de energia possíveis, podemos desprezar as energias eléctrica e magnética, que são, no entanto, muito importantes na alta atmosfera (ionosfera; magnetosfera).

Devido à esfericidade da Terra, à forma elíptica da órbita e à inclinação do eixo da Terra, a radiação solar não se distribui, uniformemente, no sistema climático. A quantidade de energia solar incidente e absorvida é muito maior nas regiões intertropicais do que nas regiões das latitudes elevadas e polares. Quando se considera o sistema climático no seu todo, as observações mostram que a Terra, em média, perde por emissão da radiação infravermelha uma quantidade de energia, igual à que recebe, de origem solar. Este equilíbrio médio das duas formas de energia radiante aplica-se apenas à Terra, como um todo, e refere-se às condições médias num período de um a vários anos. Não se verifica para um intervalo de tempo pequeno, nem para uma área limitada.

Devido à variação, relativamente pequena, das temperaturas observadas entre o equador e os pólos a variação com a latitude da radiação terrestre emitida, é muito menos acentuada do que a variação correspondente da radiação solar absorvida. Por isso, verifica-se um excesso de energia nas regiões tropicais e subtropicais e a um déficit de energia nas regiões de latitudes superiores a 34 graus (ver fig. 7). Esta distribuição de fontes e sumidouros de energia constitui a causa fundamental de todos os processos termodinâmicos, em geral irreversíveis, que ocorrem no sistema climático, incluindo as circulações gerais da atmosfera e dos oceanos.

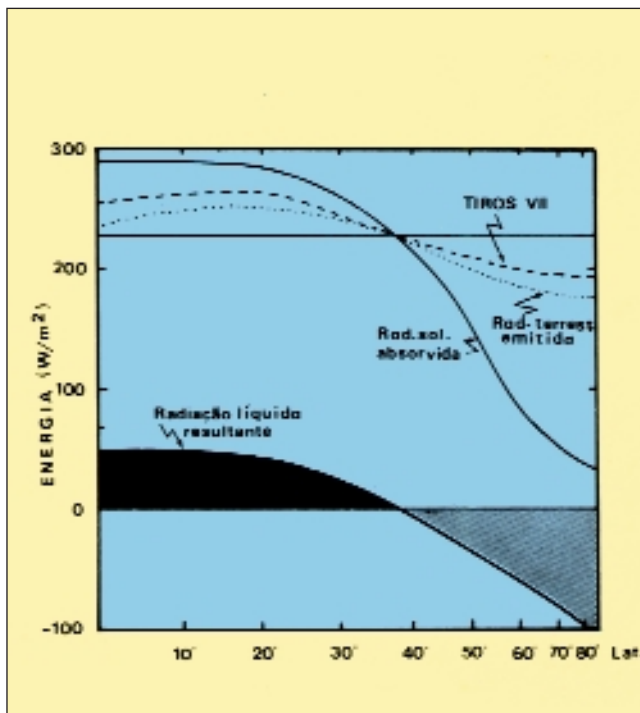


Fig. 7 – Distribuições médias anuais da radiação solar absorvida e da radiação terrestre emitida. Nas latitudes baixas há um excesso da energia radiante líquida e, portanto, um aquecimento, enquanto que nas latitudes médias elevadas há um déficit de energia e, portanto, um arrefecimento. O eixo das latitudes está graduado de forma a preservar as áreas na representação.

É evidente que, para manter o regime estacionário que na realidade se observa, tem de haver um mecanismo que transporte o excesso de energia das regiões tropicais para as regiões das latitudes elevadas e polares. Se não fosse assim, as regiões tropicais, sujeitas a um aquecimento constante, teriam temperaturas cada vez mais elevadas, enquanto que as regiões polares, a arrefecer continuamente, teriam temperaturas cada vez mais baixas. E não se verifica uma coisa nem outra. O excesso de energia das regiões tropicais é transportado pelas circulações atmosféricas e dos oceanos para as regiões de latitudes elevadas. Estes transportes contribuem, portanto, para estabelecer o regime estacionário que, em média, se verifica e para limitar a gama das temperaturas observadas no Globo.

Na fig. 8 apresentamos uma síntese do balanço da energia na atmosfera, com uma vista integrada dos fluxos das várias formas de energia, do modo como se efectuam os balanços da energia e da radiação no sistema climático. Os valores dos fluxos das várias formas de energia obtêm-se atribuindo o valor de 100 unidades ao fluxo médio da radiação solar incidente, no topo da atmosfera. Os valores representam as médias anuais para toda a atmosfera. Por uma questão de simplicidade não se apresentam, separadamente, os esquemas com os diagramas do fluxo da energia para os outros subsistemas do sistema climático.

Como se mostra na figura, nem toda a energia incidente inicial é utilizada pelo sistema climático. Uma fracção substancial (30%) da radiação solar incidente é reflectida (albedo 0,30) pelas nuvens (0,20) e, em menor quantidade, pela superfície do globo (0,05), e difundida pela atmosfera (0,05). Logo, esta fracção da energia solar não participa na grande máquina térmica, que é o sistema climático. Dos 0,70 restantes, 0,20 são absorvidos pela atmosfera e pelas nuvens e 0,50 pelos oceanos, pela litosfera e pela criosfera. Esta última fracção de energia será, em parte, utilizada para manter o ciclo hidrológico, através da evaporação (0,24), indo depois aquecer a atmosfera, indirectamente, quando a água se condensa, e se libertar o calor latente na atmosfera logo que se formam as nuvens. Outra parte (0,06) é utilizada em aquecer a atmosfera, directamente, através do fluxo de calor sensível do Globo para a atmosfera. Os restantes 0,20 são retidos e utilizados em aquecer a camada da superfície do globo e perder-se-ão, depois, como radiação infravermelha para a atmosfera (0,14) e para o espaço exterior (0,06).

A energia solar absorvida pela atmosfera é utilizada em aumentar as suas energias interna e potencial, que, por sua vez, serão parcialmente convertidas (cerca de 0,01) em energia cinética, para estabelecer e manter as circulações gerais da atmosfera e dos oceanos, contra a dissipação, por atrito. Finalmente, a atmosfera irradiará para o espaço cerca de 0,64, da energia absorvida sob a forma de radiação infravermelha, fechando assim o ciclo da radiação.

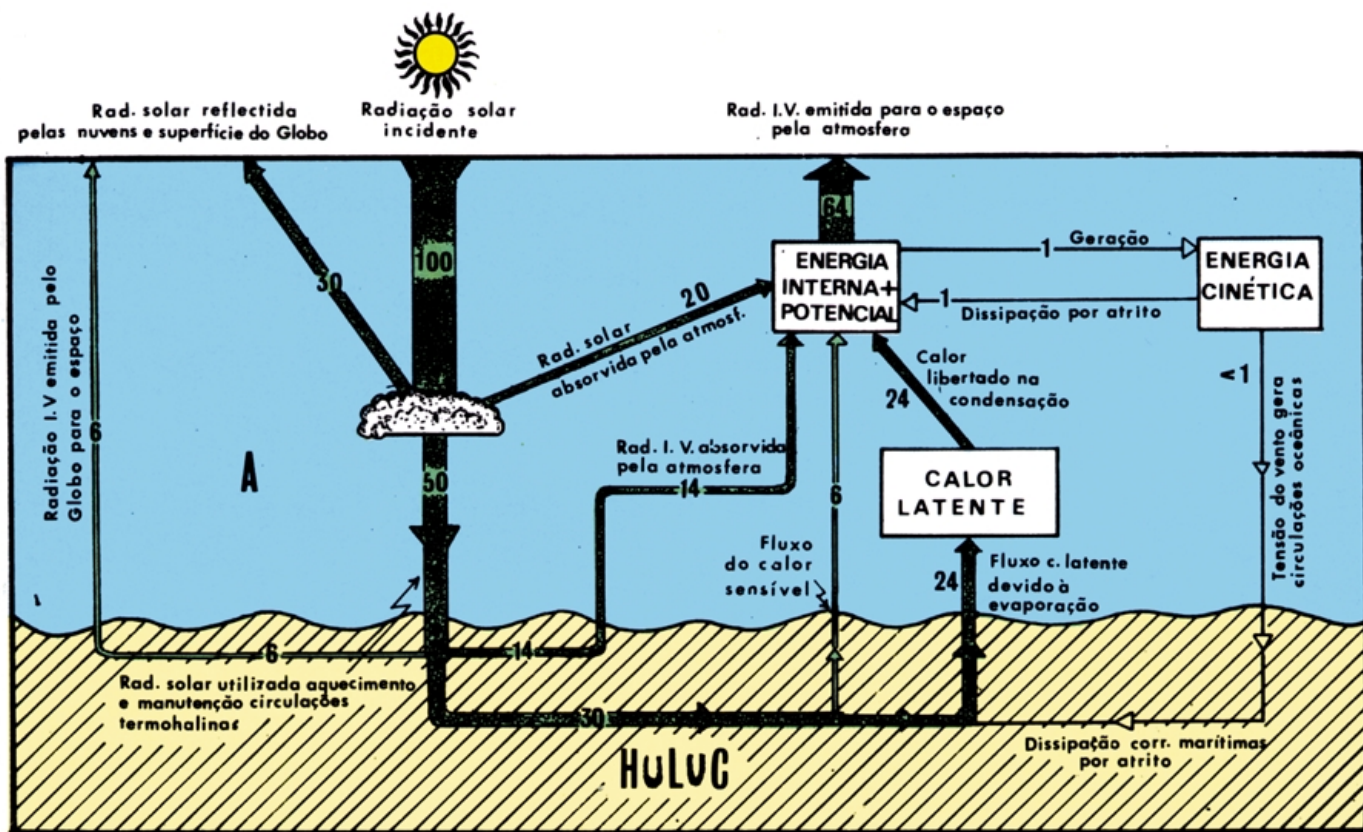


Fig. 8 – Diagrama do fluxo de energia no sistema climático. À radiação solar incidente atribui-se o valor 100 unidades. Os valores representam médias anuais para o sistema climático. A radiação solar incidente média na superfície da Terra é dada por $S_0/4$ em que S_0 representa a constante solar cujo valor é 1370 w/m^2 .

OS PRINCÍPIOS E LEIS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA E O SISTEMA CLIMÁTICO

O comportamento do sistema climático é regido por princípios e leis fundamentais da Física «*que não se podem evitar, nem repeli*». São a *Lei da Gravidade*, o *Primeiro* e o *Segundo Princípios Fundamentais da Termodinâmica*, a *Lei Fundamental da Dinâmica* e o *Princípio da Conservação da Massa*. A Lei da Gravidade (Newton) está sempre presente em todos os fenómenos que envolvam a massa, ou as suas variações, porque todo o corpo na Terra fica sujeito à acção da gravidade;

Como sabemos, no sistema climático, as formas de energia incluem a energia radiante, a energia térmica, a energia mecânica (potencial e cinética), a energia química e as energias eléctrica e magnética. As formas predominantes da energia são, no entanto, a radiante, a térmica e a mecânica, como indicámos.

Todo o processo climático envolve transferências, ou transformações de energia. Todavia, no seu conjunto, «*a energia global total do sistema não pode ser gerada nem destruída; mantém-se invariante*». É esta uma forma de enunciar o Primeiro Princípio Fundamental da Termodinâmica, ou o Princípio da Conservação da Energia. Da energia recebida por um sistema, uma parte é retida ou armazenada; possivelmente sob formas diferentes, e outra é transferida pelo sistema. Assim, da energia solar

recebida pelo sistema climático, uma parte é utilizada em aquecer os oceanos e a litosfera, em gerar a energia potencial disponível para as circulações planetárias dos oceanos e da atmosfera, em manter a evaporação e o ciclo hidrológico e em alimentar a fotossíntese. Outra parte é utilizada em aquecer a própria atmosfera e gerar a fotodissociação e ionização das moléculas, aparecendo na atmosfera superior sob as formas de energia química (v.g. ozonosfera) e eléctrica e magnética (v.g. ionosfera e a magnetosfera), etc. Finalmente, outra parte é reflectida e reenviada para o espaço, não participando, sequer, na dinâmica do sistema climático.

A energia solar aparece sob várias formas de energia, algumas ditas renováveis, que são a radiação solar directa e difusa, energia hídrica, a energia eólica, a energia armazenada nos combustíveis fósseis e na biomassa.

Vejamos, agora, a importância do Segundo Princípio Fundamental da Termodinâmica. Nos processos naturais há sempre uma diminuição da qualidade de energia. Com esta degradação sucessiva, a utilizabilidade da energia diminui; e não é possível, por processos naturais, a reconversão, em sentido inverso, duma forma de energia, numa forma anterior da cascata. Não há inversão natural possível, há sempre irreversibilidade.

As formas de energia que se vão obtendo, sucessivamente, na cascata, são cada vez menos nobres e o seu

grau de desorganização aumenta, inexoravelmente. Podemos sintetizar estes aspectos introduzindo o conceito de entropia e enunciar o Segundo Princípio Fundamental da Termodinâmica afirmando que «a entropia aumenta em todos os processos naturais; ou ainda: a utilizabilidade, a ordem e a organização das formas de energia diminui». Todo o sistema, entregue a si mesmo, evolui num sentido de maior desordem e de entropia mais elevada. Num processo natural, que envolva transferência de energia, esta mantém-se constante, mas o seu nível de entropia aumenta.

A Lei Fundamental da Dinâmica (2ª lei de Newton) exprime a variação da quantidade de movimento em termos das forças que a produzem. A especialização desta equação à dinâmica dos fluidos foi realizada, posteriormente, por Euler. São as equações de Euler que regem todos os fenómenos da dinâmica do geofluido e em que assentam os estudos das circulações gerais da atmosfera e dos oceanos e se baseiam os modelos hidrodinâmicos do clima.

A Terra constitui um sistema fechado e, por definição, a sua massa total é invariante. Mas há outras substâncias para as quais se verifica, em separado, o Princípio da Conservação da Massa, ou da Indestrutibilidade da Matéria. É o caso da substância água, que, numa ou em várias das suas três fases, é elemento comum a todos os subsistemas do sistema climático. Todos participam na sua circulação no sistema climático, originando o ciclo hidrológico (fig. 9). Assim, podemos dizer que «a quantidade total da substância água nas suas três fases, sólida, líquida e vapor existentes na Terra se mantém constante». Em termos gerais, distribui-se pelos três reservatórios principais que, pela ordem de importância, são os oceanos, os continentes (litosfera e criosfera) e a atmosfera. A litosfera contém, além da água subterrânea, uma quantidade apreciável de água de cristalização retida nas várias formações litológicas, não sendo fácil fazer uma estimativa fundamentada.

O ciclo hidrológico é uma consequência do princípio da conservação da água nas suas três fases na Terra. Descreve uma sequência fechada de fenómenos naturais em que o Globo cede, por evaporação, água à atmosfera que depois é devolvida em estado líquido ou sólido, sob a forma de precipitação à Terra, onde é parcialmente retida na superfície e, se infiltra, ou se escoia ao longo dos rios, para depois voltar a evaporar-se novamente. Como, muito bem, se diz no *Ecclesiastes*:

«Os rios correm para o mar, contudo o mar nunca se enche. Os rios vão desaguar ao lugar donde saíram, para voltarem a correr»

Ecclesiastes (11:3;1:7)

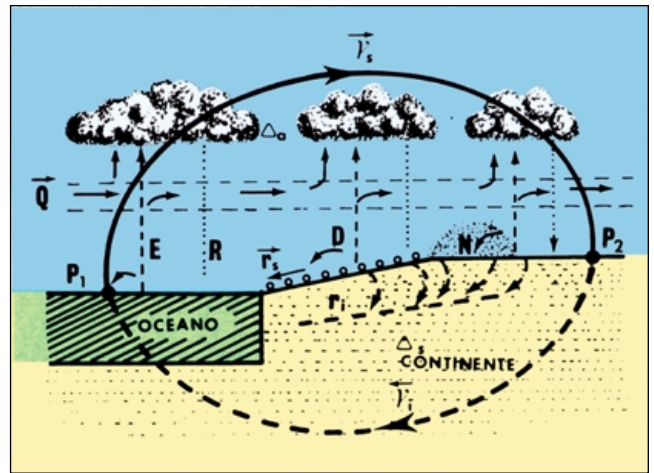


Fig. 9 – O ciclo da água na Terra, de forma muito esquemática, é constituído por duas partes: o ramo aéreo (curva a cheio) e um ramo terrestre (curva a tracejado). A Terra lança água para a atmosfera, principalmente através da evaporação dos oceanos e das plantas. Esta água é transportada pela circulação geral da atmosfera, na fase gasosa (vapor de água) e nas fases condensadas (nuvens). Mais tarde, a água cairá, eventualmente, sobre a superfície da Terra, por precipitação líquida (chuva) ou precipitação sólida (neve, granizo); se cai sobre os continentes, uma parte infiltra-se e outra escoia-se para os lagos, ou para os rios, que a transportam novamente para os oceanos, ou evapora-se, directamente, para a atmosfera.

O Primeiro Princípio Fundamental afirma que a energia do universo é constante e não pode ser criada, nem destruída. Só a sua forma pode mudar, mas não a sua essência. O Segundo Princípio, a Lei Fundamental da Entropia, afirma que a energia só pode mudar numa direcção única: de formas de energia mais utilizável, para formas de energia menos utilizável, de formas mais ordenadas (menor entropia), para formas menos ordenadas (maior entropia), ou, ainda, de formas de maior disponibilidade para formas de energia de menor disponibilidade.

O Segundo Princípio, em essência, diz que a entropia é um índice da medida em que a energia disponível num dado sistema se transforma em energia menos disponível, devido à evolução do estado do subsistema. A entropia é uma medida da quantidade de energia, que já não é possível converter em trabalho. Há quem, teimosamente, se recuse a aceitar o facto de que a Lei da Entropia é soberana em toda a realidade física do Universo. Ao negarmos a Lei da Entropia, e as suas consequências, estamos como aquele homem que se recusa a acreditar na Lei da Gravidade e se deita dum arranha-céus abaixo.

Um aumento de entropia significa uma diminuição da energia disponível e a evolução para um estado de maior dissipação. Não há forma de escapar ao Princípio da Entropia. É a Lei suprema da Física e invade todos os processos do mundo da empirologia do real. Porque tudo é energia, esta tende, em processos naturais, a passar sempre duma forma mais utilizável para outra menos utilizável.

A entropia dá-nos a direcção do crescimento do tempo, mas não nos dá o seu ritmo. A entropia, em processos naturais, aumenta sempre, mas não opera, regularmente, como um relógio. Umaz vezes aumenta mais rapidamente, outras vezes mais devagar. A rapidez é muito variável. A Segunda Lei não dá a velocidade da degradação; esta pode ser acelerada ou retardada.

A ENTROPIA NO SISTEMA CLIMÁTICO

No sistema climático ocorrem numerosos processos que conduzem a um aumento de entropia (processos irreversíveis). Entre estes, podemos mencionar a absorção da radiação solar e terrestre, a condensação, a evaporação, a fusão dos gelos e das neves, a erosão da crosta terrestre pelos ventos e pela água corrente, a difusão turbulenta e molecular dos gases, a dissipação dos ventos, devido ao atrito, e a mistura de massas de ar.

Os fenómenos meteorológicos e outros fenómenos naturais, que ocorrem no sistema climático, são, na grande maioria, caracterizados por uma grande irreversibilidade e evoluem no tempo, com um forte aumento de entropia.

Da turbulência atmosférica originada pelo vento na camada de atrito planetária, junto à superfície do Globo, não se pode reconstituir a corrente organizada inicial; uma nuvem não pode, espontaneamente, ser reconstituída pela mesma água que perdeu, por precipitação; os rios não correm da foz para a nascente; a água dos mares não se decompõe, espontaneamente, em oxigénio e hidrogénio. E no entanto, nenhum destes fenómenos contraria o Primeiro Princípio.

Todavia, são impossíveis, à luz do Segundo Princípio.

Como se explica então que, com estes aumentos sucessivos e generalizados de entropia, não se tenha atingido um valor global limite, suficientemente elevado, que impeça a ocorrência de fenómenos meteorológicos organizados? Como explicar o alto nível de organização de certos processos atmosféricos, que caracterizam o estado do tempo e o facto destes processos tenderem a evoluir duma forma ordenada, que, à primeira vista, parecem conduzir a uma diminuição de entropia? Por exemplo, existe na atmosfera um sistema altamente organizado de ventos zonais, que fazem parte da sua circulação geral. O mesmo se é levado a admitir quando se verifica que duma forma persistente, em cada segundo, milhares de toneladas de vapor de água, evaporados à superfície do Globo, se elevam na atmosfera, vencendo a força de gravidade, indo alimentar o ciclo hidrológico. A fotossíntese constitui outro exemplo que parece contrariar a lei de aumento de entropia, ao permitir o crescimento das plantas, ano após ano, através da absorção do dióxido de carbono, em presença da luz solar. Todos estes processos, que parecem actuar contra a lei do aumento da entropia, têm, em comum, o facto de se processarem em sistemas abertos, à custa da

alta qualidade da luz solar incidente e da sua variação sistemática com a latitude.

Comparemos a radiação solar, de pequeno comprimento de onda, com a radiação infravermelha emitida pela Terra. Como diz a lei de Wien, o comprimento de onda, que corresponde ao máximo do poder emissivo, é inversamente proporcional à temperatura absoluta do corpo emissor. Ora os c.d.o. que correspondem aos máximos poderes emissivos são 0,48 mm para a radiação solar e 10 mm para a radiação terrestre. A energia radiante tem uma estrutura granular de acordo com a teoria dos *quanta* (Planck). Um *quantum* de energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação correspondente. Logo, as radiações de menor comprimento de onda (λ), têm mais energia, ϵ , do que as de maior comprimento de onda. (Pela lei de Planck $\epsilon = hc/\lambda$, em que h é a célebre constante de Planck). Para o máximo da energia da radiação solar o quantum vale 4×10^{12} erg e para o máximo da energia da radiação terrestre um quantum vale apenas $0,2 \times 10^{12}$ erg.

A energia radiante total recebida pela Terra, proveniente do Sol é, praticamente, igual à quantidade de energia perdida pela Terra, por radiação, para o espaço exterior. Mas, a qualidade das duas radiações é muito diferente, pois que a primeira é constituída por um número menor de quanta, mais ricos em energia, do que a segunda. Por isso, a entropia global da radiação solar recebida na Terra é muito menor do que a entropia total da radiação terrestre emitida. Logo, a transição natural resultante no balanço da energia radiante solar e terrestre no planeta Terra dá-se no sentido de aumentar o comprimento de onda e o alargamento do domínio dos comprimentos de onda e o consequente desordenamento da radiação.

Este mesmo resultado pode obter-se da Termodinâmica clássica. De facto, a Terra está em equilíbrio radiativo médio, o que significa que a quantidade de energia ΔQ , que recebe do Sol, cuja temperatura é da ordem de 6000°K , é igual à quantidade de energia emitida pela Terra, cuja temperatura média é da ordem de 250°K . Logo, como a variação da entropia, ΔS , é dada por:

$$\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{T}$$

sendo T a temperatura absoluta a que ocorrem as transformações (Clausius, 1865), a entropia exportada pela Terra para o espaço é 20 a 30 vezes maior do que a entropia importada do Sol.

Quer dizer, a Terra recebe energia solar de boa qualidade e devolve para o espaço energia terrestre de má qualidade. É este manancial de energia de alta qualidade e o expurgo da energia de baixa qualidade que regenera os fenómenos meteorológicos, que tornam possível o ciclo hidrológico, que permitem o desenvolvi-

mento das plantas e a sua renovação. Se não fosse assim, o aumento da entropia que ocorre nos fenómenos naturais levaria a uma distribuição plasmóide e equalizante da energia «*sem qualidade*», e a uma «*uniformidade chocante*» do planeta Terra...

O sistema climático é afinal uma central produtora de entropia. Importa energia solar de alta qualidade e exporta a mesma quantidade de energia, carregada de entropia.

Quando a radiação solar interfere com a matéria começam a verificar-se várias transformações, que conduzem, assim, à geração de entropia. O fluxo de energia segue o caminho da degradação sucessiva da radiação solar incidente, até ser absorvida e transformada em calor no sistema climático para, depois, ser reenviada para o espaço exterior sob a forma de energia radiante infravermelha «*de grande entropia*».

AGRADECIMENTOS

Queremos agradecer ao Lic. António Rodrigues Tomé, investigador do Instituto Geofísico Infante D. Luís e assistente na Universidade da Beira Interior (UBI), a valiosa colaboração prestada na preparação deste trabalho.

SUGESTÕES DE LEITURA

GRIBBIN, J.: *Climate Change*. Cambridge Univ. Press. Londres, 1978.

LAMB, H. H.: *Climate History and the Modern World*, Methuen, Londres e Nova Iorque, 1982.

LOCKWOOD, J.: *Causes of Climate*. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1979.

PEIXOTO, J. P. and OORT, A. H.: *Physics of Climate*. Reviews of Modern Physics, Vol. 56, n.º 3, July 1984.

PEIXOTO, J. P.: *O Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima*. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, 1987.

PEIXOTO, J. P.: *Mudanças do Clima e o Ambiente*. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, 1987.

PEIXOTO, J. P.: *Influência do Homem no Clima e no Ambiente*. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, 1987.

SCHNEIDER, S. H.: *The Genesis Strategy: Climate and Global Survival*. Plenum Press, Nova Iorque e Londres, 1976.

SELLERS-HENDERSEN, A. and ROBINSON, J. P.: *Contemporary Climatology*; Longman, Harlow, 243 pgs.